

بررسی خوردگی و آنالیز تخریب تیوب‌های ابزاردقیق

حمیدرضا گرجی^۱، محمد حسین شجاعی^{۲*}، پگاه قاسم زاده^۱، امیر کریمی^۳، علی فاتحی^۱، عبدالمجید اسلامی^۴، محمد علی گل‌عذار^۴، اصغر اشرفی لاله^۵، مجتبی غلامیان^۵

^۱ شرکت فنی مهندسی کاوش صنعت شیخ بهایی، اصفهان، ایران.

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

^۳ دانشیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

^۴ استاد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

^۵ شرکت پتروشیمی پردیس، بوشهر، ایران.

* نویسنده مسئول: hosseinshojaie1378@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۳۱

چکیده

تیوب‌های ابزاردقیق نوع خاصی از تیوب‌ها هستند که با انتخاب جنس تیوب مناسب، برای انتقال گازها مثل هوای پاک و یا سیال در تجهیزات ابزار دقیق مثل گیج فشار، مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از اصلی‌ترین علل تخریب این تیوب‌ها، پدیده خوردگی است که در محیط‌های دریایی یک مشکل شناخته شده است. در این پژوهش به بررسی سه تیوب کارنکرده بدون قرارگیری در سرویس، تیوب در سرویس مقاوم به خوردگی و تیوب تخریب شده پرداخته شده است. در این پژوهش پس از عملیات متالوگرافی، ریزساختار و نواحی خوردگی توسط میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی، خواص خوردگی توسط آزمون پلاریزاسیون سیکی و اعتبارسنجی جنس تیوب‌ها به وسیله آزمون کوانتومتری مورد بررسی قرار گرفت. پس از بررسی علل تخریب در تیوب‌ها، نتایج نشان داد که توجه ناکافی به انتخاب جنس تیوب‌ها، شرایط کاری و محیطی و تخریب لایه‌های اکسیدی از مهم‌ترین عوامل تخریب تیوب‌ها به شمار می‌روند.

کلیدواژه: آنالیز تخریب، تیوب‌های ابزاردقیق، خوردگی.

Investigation of corrosion and failure analysis of Instrumentation tubes

Hamidreza Gorji¹, Mohammad Hossein Shojaie^{1, 2*}, Pegah Ghasemzadeh¹, Amir Karimi^{1, 2}, Ali Fatehi¹, Abdoulmajid Eslami^{1,3}, Mohammad Ali Golozar^{1,4}, Asghar Ashrafi Laleh⁵, Mojtaba Gholamian⁵

¹ Kavosh Sanat Sheikh Baha'i Company, Isfahan, Iran.

² MS.c, Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

³ Assistant Professor, Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

⁴ Professor, Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

⁵ Pardis Petrochemical Complex, Asaloye, Iran.

* Corresponding Author: hosseinshojaie1378@gmail.com

Submission: 2023, 03, 21 Acceptance: 2023, 07, 22

Abstract

Instrumentation tubes is a special type of tubing selected based on material composition for the transport of gases such as clean air or fluids in precision instrument equipment like pressure gauges. One of the primary reasons for the degradation of these tubes is corrosion, a well-known issue in marine environments. This study investigates three types of tubing: unused tubing not yet in service, corrosion-resistant tubing in service, and degraded tubing. After metallographic operations, the microstructure and corrosion areas were examined using optical and electron microscopes, and the corrosion properties were analyzed through cyclic polarization tests. The material of the tubes was also validated using spectrometry tests. Following the analysis of degradation causes, the results indicated that inadequate attention to the selection of tubing material, operational conditions, and the degradation of oxide layers are among the most significant factors leading to tubing failure.

Keywords: Failure analysis, instrumentation tubes, corrosion.

۱- مقدمه

امروزه با توجه به نیاز به تولید مستمر و بدون وقفه در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی تخریب قطعات و تجهیزات گوناگون بسیار حائز اهمیت است. از مهم‌ترین قطعات موجود می‌توان به تیوب‌های ابزار دقیق اشاره کرد که برای کنترل دستگاه‌ها به منظور نظارت بر شرایط کاری، مورد استفاده قرار می‌گیرند. از جمله مواردی که در انتخاب تیوب‌ها مؤثرند می‌توان به جنس تیوب‌ها، ضخامت، دمای کاری، سرعت و جریان سیال، فشار و شرایط خوردگی اشاره کرد. به‌طور کلی تیوب‌ها از جنس‌های گوناگونی تهیه می‌گردند که برخی از آن‌ها عبارت‌اند از: فولادهای زنگ‌نزن، آلیاژهای مس و آلیاژهای آلومینیوم [۱، ۲]. در تخریب این تیوب‌ها عوامل متعددی تأثیر گذارند. یکی از این عوامل خوردگی و به‌خصوص خوردگی اتمسفری و حفراهی است. خوردگی اتمسفری خورده شدن مواد در معرض هوا و آلودگی‌های موجود در آن است. به‌طور عمده در محیط‌های دریایی ذرات کلریدی ریزی که به‌وسیله باد حمل می‌شوند بر روی سطوح فلزی رسوب می‌کنند و منجر به این نوع خوردگی می‌شوند. لازم به ذکر است یکی از عوامل مهم در این نوع خوردگی فاصله از ساحل است؛ با توجه به قرارگیری این تیوب‌ها در نواحی نزدیک به دریا، شدت خوردگی در این مناطق بسیار زیاد است. این محیط به دلیل وجود شرایط کاری که ترکیبی از رطوبت، دما و ذرات کلریدی است، در بین خورنده‌ترین اتمسفرها قرار می‌گیرد [۳، ۴].

در پژوهشی بارتون [۵] به بررسی تئوری و راه‌های جلوگیری از خوردگی اتمسفری پرداخت. طبق مطالعات او، عوامل مختلفی بر خوردگی اتمسفری تأثیرگذار هستند که می‌توان به ترکیب فلز یا آلیاژ، درجه حرارت، محیط و محصولات خوردگی اشاره کرد. به‌عنوان مثال پرکاربردترین نوع تیوب‌ها فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ برای محیط‌های خورنده و فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ برای محیط‌های دریایی است [۶].

در پژوهشی نیز کامیمورا و همکاران [۷] به بررسی نقش یون کلرید در خوردگی اتمسفری فولادها پرداختند. بر اساس نتایج بدست آمده، کلریدها به‌عنوان یکی از متغیرهای مهم در

خوردگی اتمسفری به شمار می‌روند. حضور نمک‌های آب‌دوست مثل NaCl در محیط‌های ذکر شده، علاوه بر تشکیل الکترولیت سطحی منجر به شرکت مستقیم یون کلرید در واکنش‌های الکتروشیمیایی خوردگی می‌گردد [۴، ۸، ۹]. کلریدها در گستره وسیعی از محیط‌های صنعتی حضور دارند. صنایع نیروگاهی و نفت و گاز از دسته محیط‌هایی هستند که با خوردگی حفراهی، خوردگی اتمسفری، خوردگی شیاری و خوردگی تنشی^۱ در فولادهای زنگ‌نزن که در معرض محیط‌های کلریدی هستند حائز اهمیت است [۱۰].

پدیده خوردگی حفراهی در فولادهای زنگ‌نزن شامل شکست لایه روئین^۲، تشکیل حفره پایدار و رشد حفره است [۱۱]. شکست لایه روئین در اثر جذب هالید، نازک شدن لایه روئین و در نهایت نفوذ هالید رخ می‌دهد. به‌صورت کلی یون‌های هالید خواص لایه روئین را تحت تأثیر قرار می‌دهند [۹]. در پژوهشی هوار و همکاران [۱۲] به بررسی شکست لایه روئین در فولادهای زنگ‌نزن پرداختند. بر اساس نتایج حاصل شده، با افزایش غلظت یون‌های هالیدی ضخامت لایه روئین کاهش می‌یابد و در این میان بیشترین تأثیر بر کاهش ضخامت به عهده یون‌های کلرید است. علاوه بر آن، طبق مدل عیوب نقطه‌ای توانایی کلر در تخریب و شکست لایه روئین بیشتر از دیگر هالیدها است. باید در نظر داشت که فولادهای زنگ‌نزن که در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند، دارای آخال و یا ذرات گاز ثانویه‌ای هستند که محل‌های ترجیحی جهت شروع خوردگی حفراهی به شمار می‌آیند [۱۳، ۱۴]. در صورت قرارگیری فولاد زنگ‌نزن در شرایط نامناسب کاری، جوشکاری و یا عملیات حرارتی، پدیده حساس شدن فولاد پدید خواهد آمد. این امر منجر به تشدید خوردگی به علت تخلیه کروم خواهد شد.

^۱ SCC^۲ Passive

خوردگی حفره‌ای فولادهای زنگ‌نزن در تمام محلول‌های حاوی هالید به جز F^- رخ میدهد؛ چرا که یون F^- به‌عنوان یک بازدارنده برای خوردگی شیاری عمل می‌کند. در مقایسه بین هالیدها لازم به ذکر است که بیشترین تأثیر بر خوردگی حفره‌ای در فولادهای زنگ‌نزن مربوط به Cl^- بوده و پس از آن به ترتیب یونهای Br^- و I^- قرار دارند [۱۵]. با توجه به اهمیت این تیوب‌ها در صنایع مختلف و همچنین اثر گذاری بالای این تیوب‌ها بر راندمان صنایع وابسته، تخریب و خوردگی این تیوب‌ها، از اهمیت بالایی برخوردار هستند لذا در این مطالعه به بررسی خوردگی و آنالیز تخریب تیوب‌های ابزار دقیق پرداخته شد.

۲- مواد و روش تحقیق

به‌منظور بررسی و دستیابی به علل و مکانیزم‌های تخریب در تیوب‌های تخریب شده، کارنکرده و مقاوم به خوردگی، آزمایش‌های گوناگونی بر روی قطعات تخریب شده صورت گرفت. در راستای بررسی علل تخریب در تیوب‌های موجود، سه نمونه متفاوت از تیوب‌ها مورد بررسی قرار گرفت: نمونه تخریب شده: در شرایط سرویس‌دهی دچار خوردگی شده و تخریب در آن رخ داده بود. نمونه کارنکرده: نمونه کارنکرده از تیوب‌های به کار گرفته شده که در سرویس قرار نگرفته بود. نمونه مقاوم به خوردگی: در شرایط سرویس‌دهی مقاومت به خوردگی خوبی از خود نشان داده و تخریب در این نمونه مشاهده نشده بود.

جهت مطالعه خوردگی و آنالیز تخریب تیوب‌ها، قسمت‌های متفاوتی از سطوح داخلی و خارجی تیوب‌ها مورد بررسی قرار گرفت. به‌منظور بررسی ریزساختار نمونه‌های موجود، آزمون متالوگرافی مخرب بر روی هر سه نمونه صورت گرفت. مطابق استاندارد ASTM E340 فرایندهای سنباده‌زنی و پولیش بر روی نمونه‌ها انجام شد. سپس طبق استاندارد ASTM E407 و هندبوک متالوگرافی، شرایط اچ شیمیایی و الکتروشیمیایی توسط محلول‌های گوناگون مورد بررسی قرار گرفته. بر روی نمونه‌ها انجام شد.

به‌منظور بررسی ریزساختار، مورفولوژی و فازهای موجود در نمونه‌ها، ابتدا از محلول گلیسرژیا با ترکیب ۱۰ میلی‌لیتر HNO_3 ، ۳۰ میلی‌لیتر HCl و ۳۰ میلی‌لیتر گلیسرول بهره بردیم. این محلول تحت ولتاژ ۶ ولت، در مدت زمان ۲۰ ثانیه ریزساختارهای فولاد زنگ‌نزن به کار برده شده در تیوب‌ها را آشکار کرد. به‌منظور بررسی حفره فاز سیگما از اچ متوالی استفاده شد. در ابتدا از محلول ۸٪ اگزالیک اسید در ولتاژ ۶ و مدت زمان ۱۰ ثانیه برای مشخص شدن ساختار زمینه و بعد از آن از محلول 5g $KMnO_4$ ، 5g $NaOH$ و ۹۰ میلی‌لیتر آب برای اچ شیمیایی با مدت زمان ۲۰ ثانیه استفاده شد. پس از انجام این دو مرحله اچ، فاز سیگما در نمونه‌ها مشاهده نشد. ترکیب شیمیایی قطعات توسط آزمون کوانتومتری طبق استاندارد ASTM E415 بررسی شد [۱۶]. به‌منظور بررسی سطوح خوردگی و تعیین عنصرهای شیمیایی قطعات، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) تجهیز شده با طیف‌سنجی پرتو ایکس (EDS) مدل Philips XI30 ساخت کشور هلند استفاده شد. جهت بررسی ساختار و آخال‌ها تصویربرداری به‌وسیله میکروسکوپ نوری مدل Nikon صورت گرفت. در آزمون پلاریزاسیون ابتدا لازم است تا سل الکتروشیمیایی به شرایط پایدار بدون تغییر زیاد در پتانسیل برسد. زمان رسیدن به پتانسیل تعادل وابسته به سل الکتروشیمیایی از چند دقیقه تا چند ساعت متغیر است. آزمون پلاریزاسیون در محیط‌های مختلفی انجام می‌شود. در ابتدا نمونه‌ها توسط فرآیندهای سنباده‌زنی و... آماده‌سازی شدند. به‌منظور رسیدن به نتیجه دقیق‌تر تست هر نمونه بلافاصله پس از آماده‌سازی انجام شد. در این آزمون از محلول 3.5% $NaCl$ استفاده شد و طبق استاندارد ASTM-G61 آزمون پلاریزاسیون سیکلی^۱ انجام شد [۱۷].

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مشاهدات چشمی

در شکل ۱ تصاویر متفاوتی از این سه نمونه تیوب نشان داده شده است. نمونه تخریب شده به طور جامع بررسی شد تا علت تخریب در آن مشخص شود. از این نمونه در سطوح داخلی و خارجی، سطح مقطع و... نمونه‌هایی تهیه گردید تا مورد بررسی قرار گیرد.

¹ Cyclic Polarization

است. سه نوع تیوب مورد بررسی از جنس فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی می‌باشند که تیوب تخریب شده گرید SS304L، تیوب کارنکرده گرید SS316 و تیوب مقاوم به خوردگی گرید SS316L می‌باشند.

اگرچه فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی دارای مقاومت به خوردگی خوبی هستند؛ اما به دلیل حساسیت به خوردگی موضعی از قبیل خوردگی حفره‌ای، خوردگی بین‌دانه‌ای و خوردگی تنش (SCC) در محیط‌های حاوی کلر مشکلاتی را به وجود می‌آورد. علاوه بر آن وجود تنش‌های باقیمانده نیز می‌تواند این قبیل موارد خوردگی را تشدید و ترغیب کند. برای مثال در خطوط لوله فشار داخلی می‌تواند سبب ایجاد تنش خوب یا حلقه‌ای گردد که باعث افزایش احتمال خوردگی می‌شود.

در تصاویر زیر می‌توان هر یک از این نمونه‌ها را مشاهده کرد.

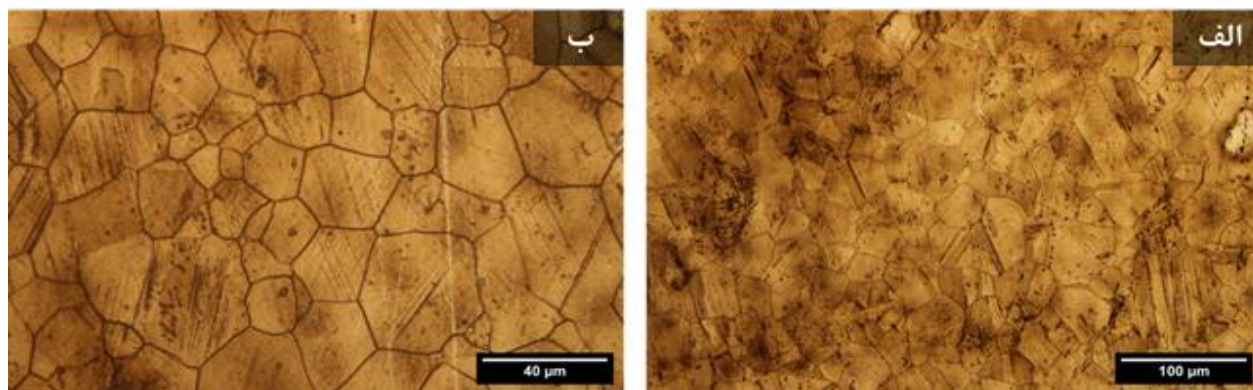
۳-۲- مشاهدات ریزساختاری و آنالیز شیمیایی

با توجه به آزمون متالوگرافی مخرب، ریزساختار حاصل از تیوب تخریب شده، تیوب کارنکرده و تیوب مقاوم به خوردگی به ترتیب در شکل ۲، ۳ و ۴ نشان داده شده است. این تیوب‌ها دارای زمینه آستنیتی می‌باشند. تفاوت در اندازه دانه‌های ریزساختار این تیوب‌ها به خوبی قابل مشاهده است. علاوه بر آن تفاوت در مقاومت به خوردگی در جهت‌گیری‌های متفاوت دانه‌ها نیز به خوبی قابل مشاهده است.

بر اساس مشاهدات حاصل از بررسی‌های میکروسکوپ نوری و نتایج حاصل از آزمون کوانتومتری که در جدول ۱ تا ۳ برای سه تیوب تخریب شده، کارنکرده و مقاوم به خوردگی آورده شده



شکل ۱- تصاویر تیوب‌های مورد بررسی: الف) تیوب تخریب شده ب) تیوب کارنکرده ج) تیوب مقاوم به خوردگی



شکل ۲- ریزساختار حاصل از تیوب تخریب شده در بزرگنمایی‌های مختلف
الف) بزرگنمایی $\times 200$ ب) بزرگنمایی $\times 500$

جدول ۱ - نتایج آزمون کوانتومتری برای تیوب تخریب شده

Fe	C	P	S	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu
Rem	0.029	0.027	0.003	0.46	0.87	17.63	0.358	8.05	0.004	0.111	0.359
Nb	Ti	V	W	Zr	Pb	Sn	As	Bi	Ca	B	Sr
0.009	<0.001	0.076	0.049	-	<0.003	0.009	0.037	<0.002	-	0.002	-

جدول ۲ - نتایج آزمون کوانتومتری برای تیوب کارنگرده

Fe	C	P	S	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu
Rem	0.037	0.031	0.004	0.403	0.93	17.11	1.93	10.14	0.01	0.183	0.145
Nb	Ti	V	W	Zr	Pb	Sn	As	Bi	Ca	B	Sr
<0.004	<0.001	0.112	0.037	-	0.005	<0.001	0.03	<0.002	-	0.003	-

جدول ۳ - نتایج آزمون کوانتومتری برای تیوب مقاوم به خوردگی

Fe	C	P	S	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu
Rem	0.021	0.036	0.006	0.421	1.02	16.56	2.01	10.31	0.008	0.186	0.275
Nb	Ti	V	W	Zr	Pb	Sn	As	Bi	Ca	B	Sr
0.058	0.002	0.092	0.069	-	0.005	0.002	0.035	<0.002	-	0.03	-

$$PREN = Cr\% + 3.3(Mo\% + 0.5 \times W\%) + 16 \times N\% \quad \text{رابطه (۱)}$$

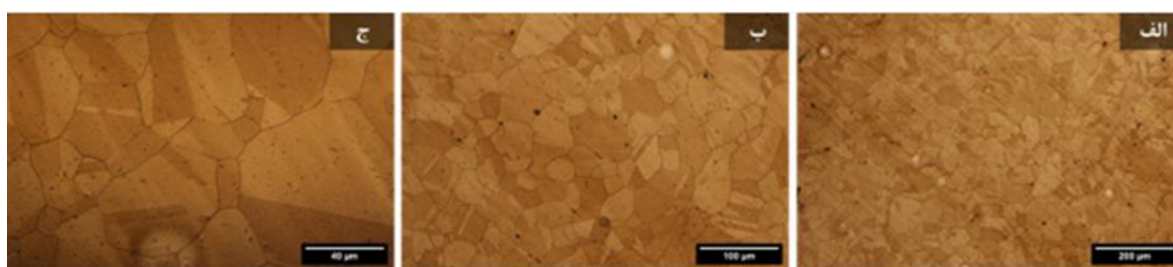
طبق مقادیر حاصل از آزمون کوانتومتری و همچنین رابطه بالا، برای تیوب تخریب شده عدد حاصل ۱۸/۹ بوده و برای تیوب کارنگرده و تیوب مقاوم به خوردگی به ترتیب مقادیر ۲۴/۱ و ۲۳/۶ به دست می‌آید. با توجه به اعداد به‌دست‌آمده، تیوب کارنگرده و تیوب مقاوم به خوردگی دارای مقاومت به خوردگی حفره‌ای بالاتری نسبت کلریدها هستند و تیوب تخریب شده پایین‌ترین میزان مقاومت به خوردگی حفره‌ای در محیط حاوی کلرید را دارد.

با توجه به تفاوت در مقدار مولیدن موجود در تیوب خورده شده با دو نمونه دیگر می‌توان گفت به دلیل اینکه مولیدن باعث پایداری لایه روئین و بهبود مقاومت به خوردگی موضعی مثل حفره‌ای شدن، خوردگی شیاری و خوردگی تنشی (SCC) می‌شود، مقاومت به خوردگی حفره‌ای پایین‌تری در این تیوب دیده می‌شود. علاوه بر آن تفاوت در مقدار نیکل، موجب تفاوت در نرخ تشکیل لایه روئین می‌شود و همچنین پایداری فاز آستنیت نیز نسبت به دو تیوب دیگر کمتر خواهد بود. یکی دیگر از پارامترهای تأثیرگذار در مقاومت به خوردگی حفره‌ای، شاخص $PREN^1$ است. فرمول محاسبه این عدد از رابطه ۱ بدست می‌آید:

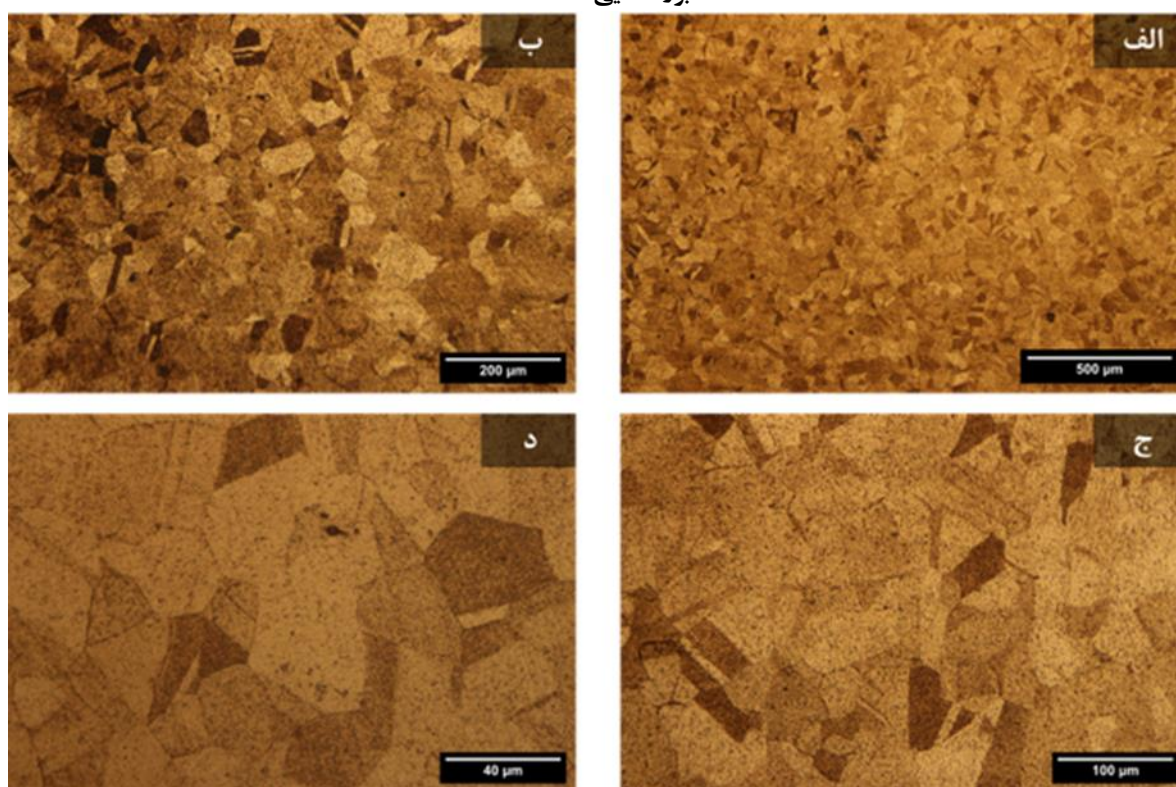
¹ Pitting resistance equivalent number

شد. طبق آنالیزهای موجود در شکل ۶، این فازهای ثانویه دارای درصدهای وزنی و اتمی نزدیک به زمینه هستند؛ همچنین در این تصویر فازهای ثانویه‌ای وجود دارند که ترکیبی نزدیک به مرزدانه دارند. وجود این ناهمگونی‌ها و عدم یکنواختی و همچنین حضور فازهای ثانویه می‌تواند منجر به تشکیل محل‌های ترجیحی جهت خوردگی حفره‌ای شود.

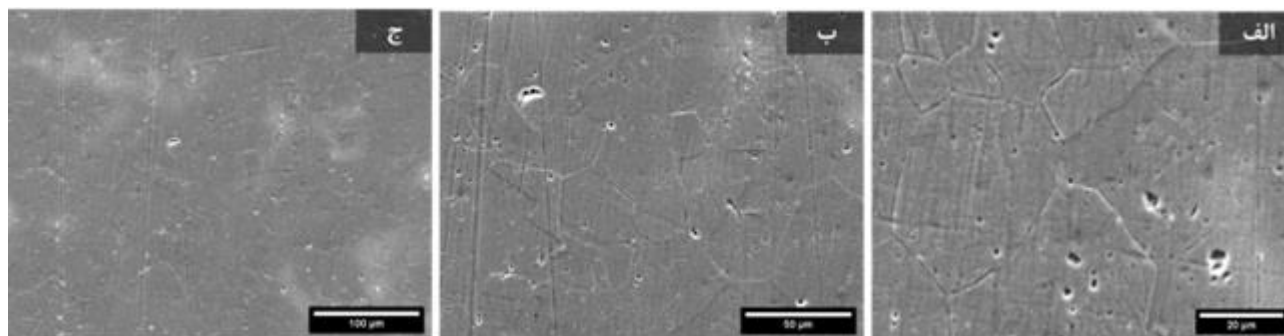
برای بررسی بهتر ریزساختار، فازهای ثانویه و مناطق خورده شده تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نواحی مختلف نیز مورد بررسی قرار گرفت. برای تیوب تخریب شده تصاویر متفاوتی از مناطق گوناگون از قبیل سطح مقطع محل‌های خوردگی خارجی و داخلی گرفته شد که در شکل ۵ نشان داده شده است. طبق تصاویر دانه‌های آستنیتی در کنار فازهای ثانویه در ساختار وجود دارند که برای درک بهتر از آنالیز EDS از این فاز ثانویه گرفته



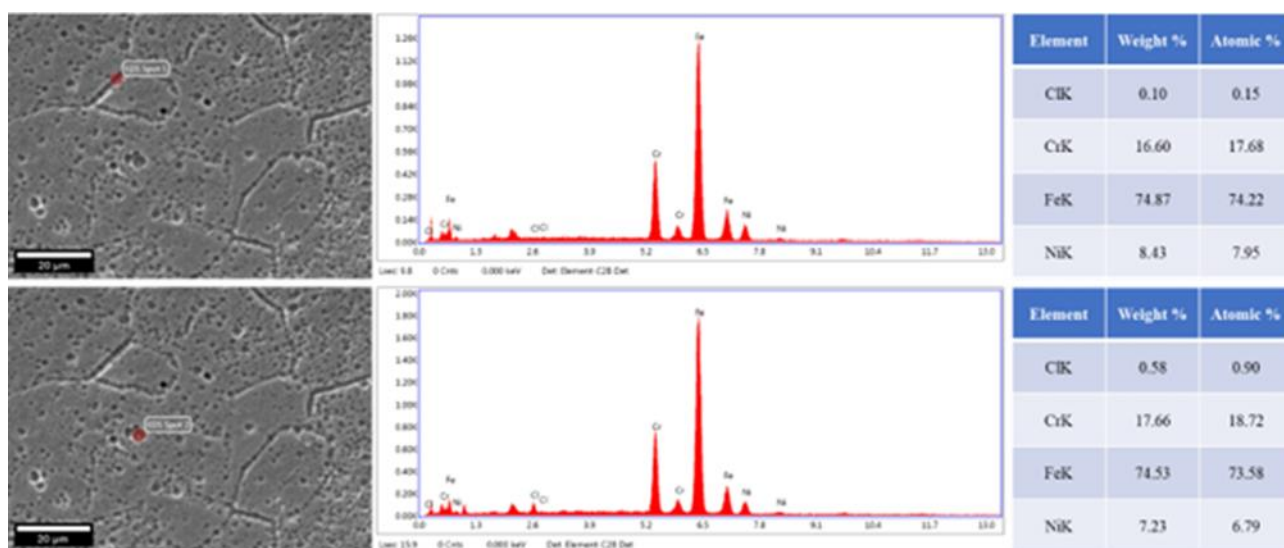
شکل ۳- ریزساختار حاصل از تیوب کارتنکرده در بزرگنمایی‌های مختلف: الف) بزرگنمایی $100 \times$ (ب) بزرگنمایی $200 \times$ (ج) بزرگنمایی $500 \times$



شکل ۴- ریزساختار حاصل از تیوب مقاوم به خوردگی در بزرگنمایی‌های مختلف: الف) بزرگنمایی $50 \times$ (ب) بزرگنمایی $100 \times$ (ج) بزرگنمایی $200 \times$ (د) بزرگنمایی $500 \times$



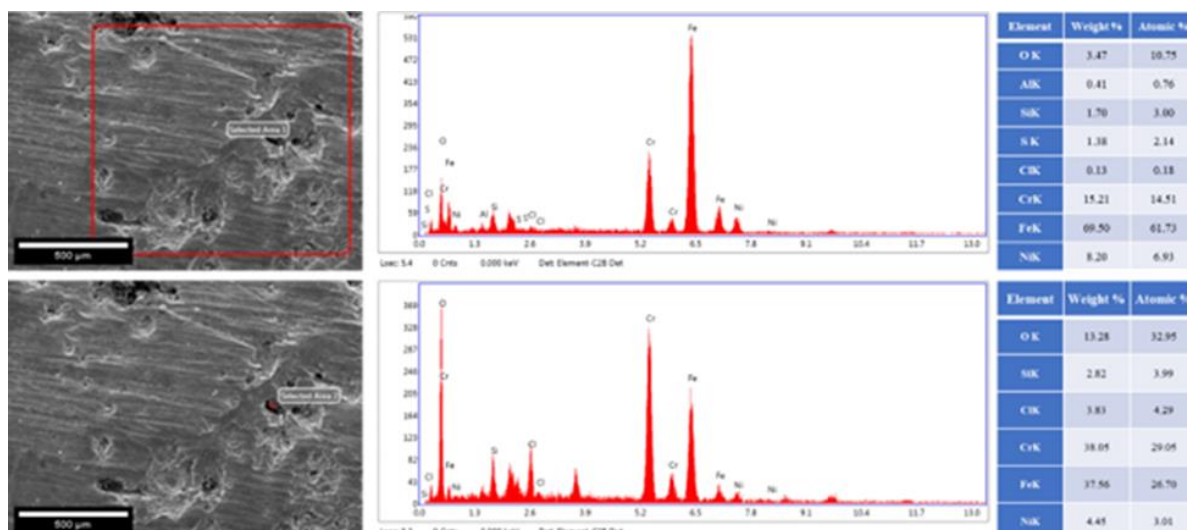
شکل ۵- تصاویر SEM از تیوب تخریب شده در بزرگنمایی‌های مختلف (الف) بزرگنمایی $20 \times$ (ب) بزرگنمایی $50 \times$ (ج) بزرگنمایی $100 \times$



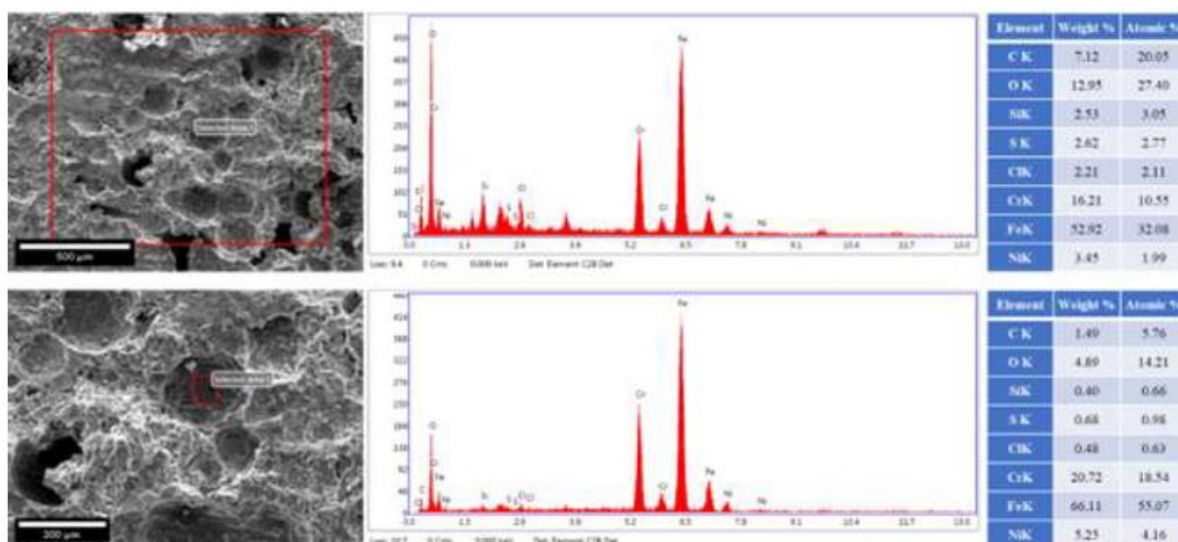
شکل ۶- تصاویر SEM و آنالیز EDS سطح مقطع خورده شده از تیوب تخریب شده

اکسیژن و کروم مواجه بودیم که این امر می‌تواند به دلیل خوردگی شدید در این مناطق و محصولات واکنش خوردگی باشد که در این حفرات گیر افتاده‌اند. طبق شکل ۸، در محل خوردگی همراه با رسوب، تصاویر به‌خوبی گویای خوردگی حفره‌ای است و حفرات تقریباً مقارنی مشاهده می‌شوند. در این مورد نیز همانند نمونه قبل از حفرات آنالیز EDS گرفته شد و افزایش قابل توجه اکسیژن و کروم، نشان از خوردگی بالا در این منطقه می‌دهد.

در بررسی دیگری از این نمونه دو محل خوردگی خارجی تیوب مورد بررسی قرار گرفت. در مورد اول به بررسی محل خوردگی بدون رسوب پرداختیم. طبق تصاویر موجود در شکل ۷ خوردگی موضعی در سطح به‌خوبی قابل مشاهده است و همچنین طبق بررسی عنصری خطی، در این مناطق با کاهش شدید عناصر آلیاژی روبرو هستیم که این تخلیه عنصری، علی‌الخصوص عنصر کروم باعث کاهش مقاومت به خوردگی می‌شود. طبق آنالیز EDS از محل حفره‌ها، با افزایش مقدار



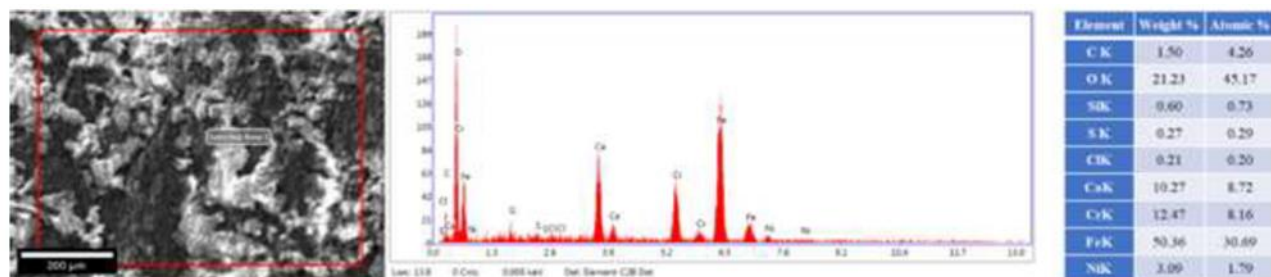
شکل ۷- تصاویر SEM و آنالیز EDS از سطح خارجی خوردگی تیوب تخریب شده بدون رسوب



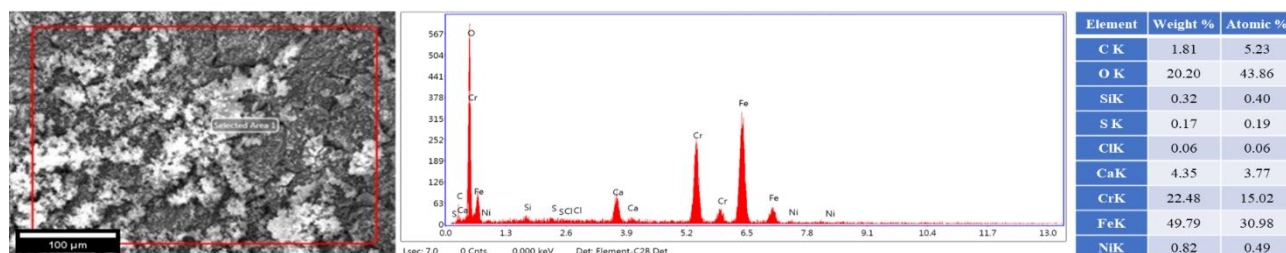
شکل ۸ - تصاویر SEM و آنالیز EDS از سطح خارجی خوردگی تیوب تخریب شده به همراه رسوب

شده وجود کلسیم مشاهده شد که این امر می‌تواند به دلیل سیال موجود در این تیوب‌ها باشد. در محل اتصال این تیوب‌ها مهره‌های نیز وجود دارند که در سطح این قطعات خوردگی مشاهده گردید این امر می‌تواند به دلیل اتصال گالوانیکی و یا شیب غلظتی باشد. در شکل ۱۱، تصویر میکروسکوپ الکترونی و آنالیز EDS از محل خوردگی مهره‌ها در تیوب تخریب شده نشان داده شده است.

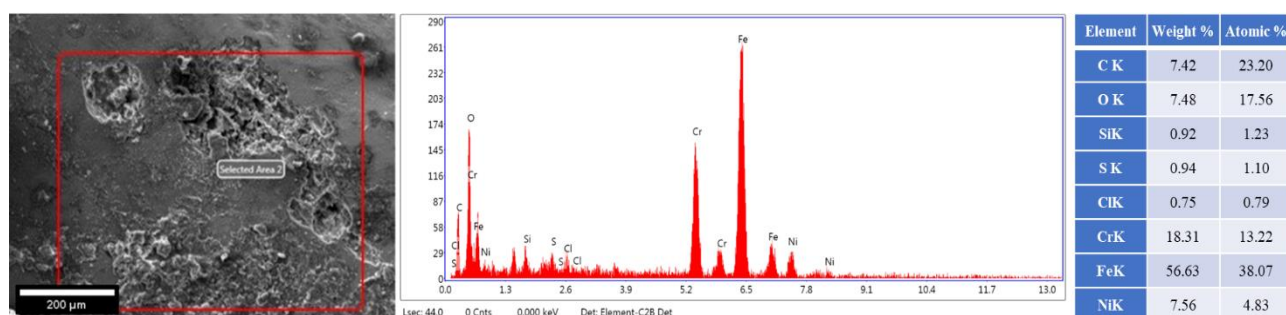
علاوه بر آن نکته حائز اهمیت در این دو مورد، افزایش شدید مقدار کلر است. طبق آنالیز EDS شکل‌های ۹ و ۱۰ از سطح خارجی خوردگی تیوب تخریب شده بدون رسوب و سطح خارجی خوردگی تیوب تخریب شده به همراه رسوب، مقدار کلر به طور قابل توجهی افزایش یافته است. افزایش مقدار کلر می‌تواند منجر به خوردگی حفره‌ای شدید شود که در این موارد نیز قابل مشاهده است. در بررسی سطوح داخلی تیوب تخریب



شکل ۹- تصویر SEM و آنالیز EDS از سطح داخلی خوردگی تیوب تخریب شده بدون رسوب



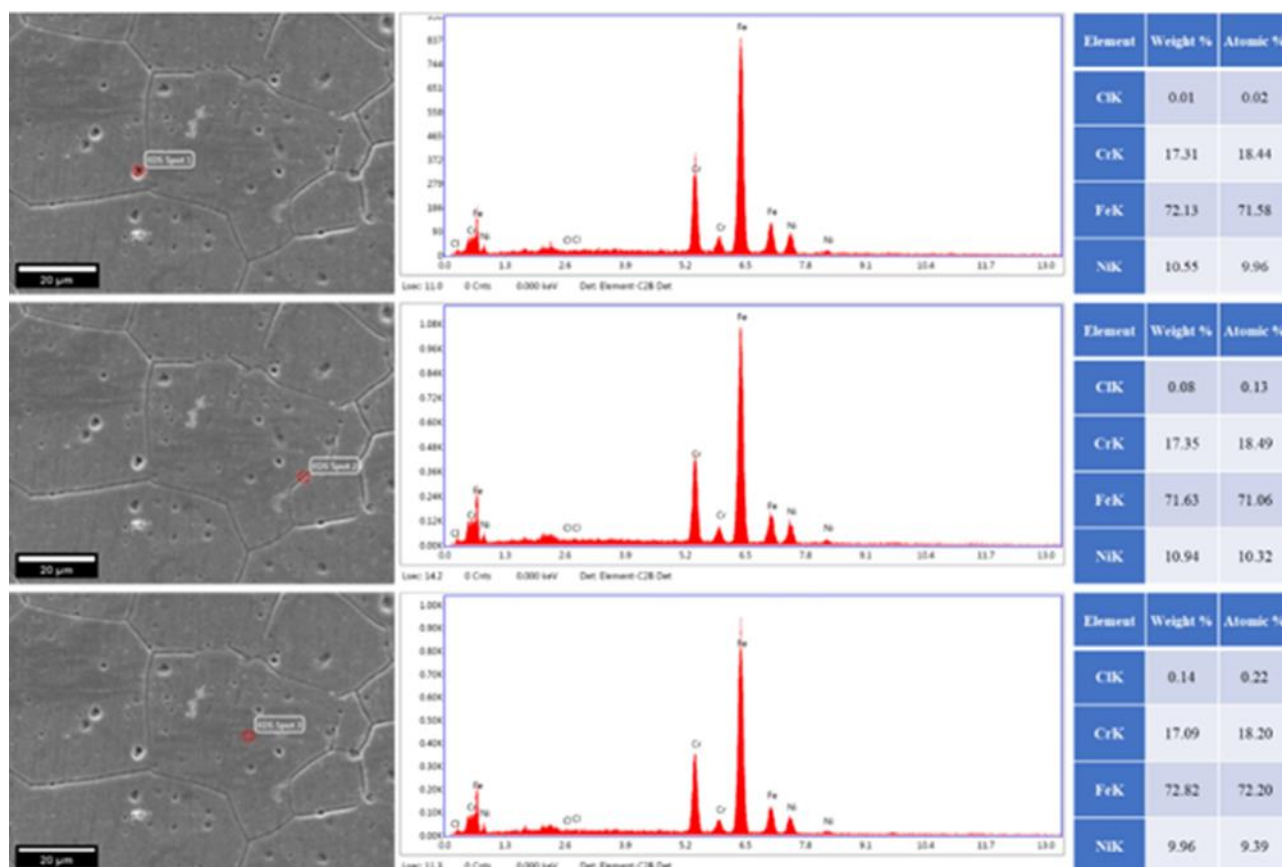
شکل ۱۰- تصویر SEM و آنالیز EDS از سطح داخلی خوردگی تیوب تخریب شده به همراه رسوب



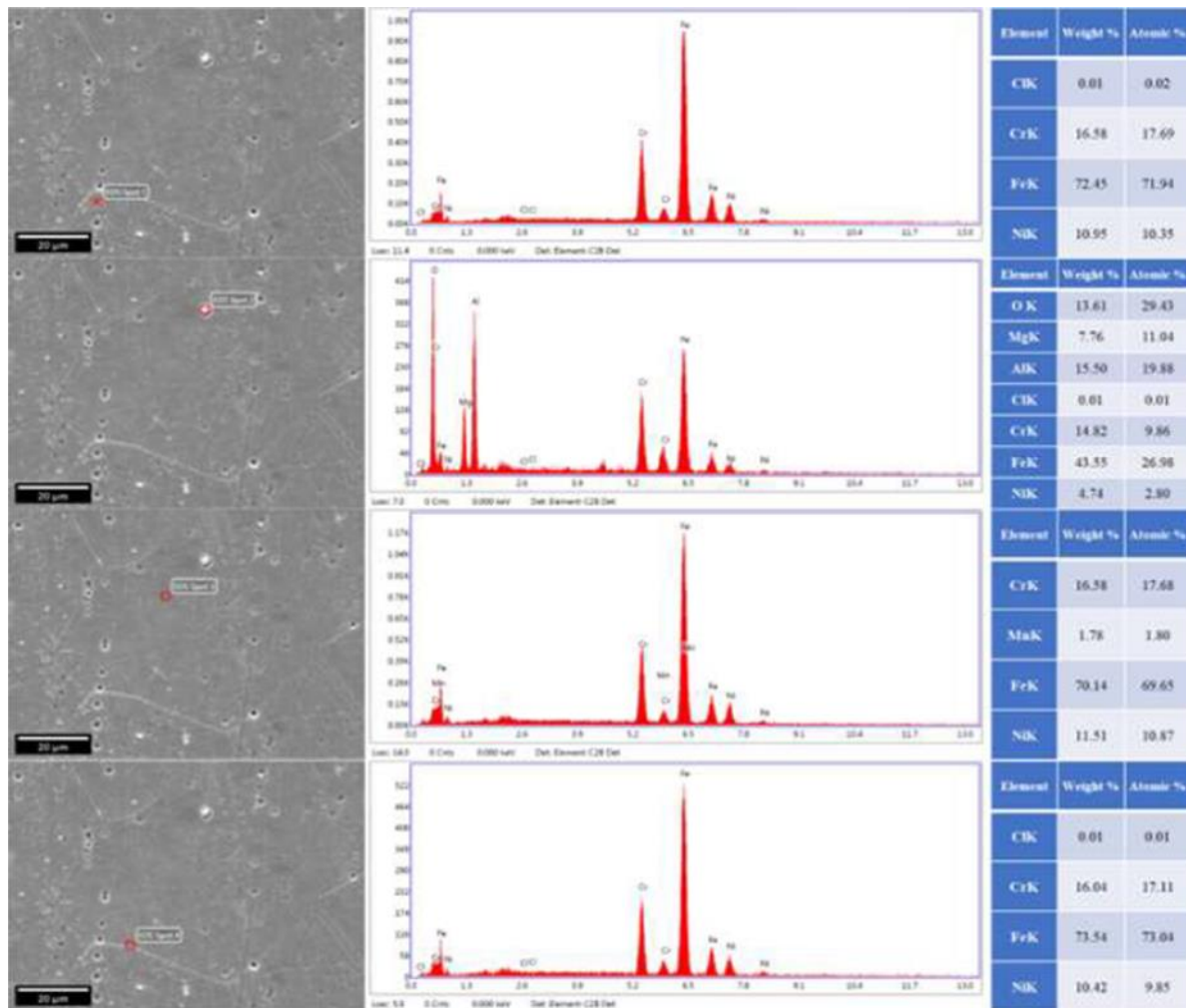
شکل ۱۱- تصویر SEM و آنالیز EDS از محل خوردگی مهره در تیوب تخریب شده

وجود آمده باشد، می‌تواند محل‌های مناسبی را برای آغاز حفره‌ای شدن باشد و در نتیجه منجر به خوردگی شود. برای بررسی تیوب مقاوم به خوردگی، تصاویر SEM از ریزساختار این تیوب، در شکل ۱۳ آورده شده است. طبق آنالیزهای موجود این ریزساختار همانند ریزساختار تیوب کارنکرده است و برخی ناهمگونی‌ها می‌تواند منجر به آغاز حفره‌ای شدن در آن شود.

برای بررسی تیوب کارنکرده تصاویر SEM ریزساختار آن، در شکل ۱۲ آورده شده است. طبق تصاویر SEM، دانه‌های آستنیتی و فاز ثانویه به‌خوبی قابل مشاهده‌اند. برای درک بهتر از این سه فاز آنالیز EDS این مناطق گرفته شد. طبق آنالیزهای موجود هر سه این مناطق دارای درصد عناصر نزدیک به هم هستند؛ اما گیرکنواختی آن‌ها که می‌تواند در حین تولید به



شکل ۱۲- تصاویر SEM و آنالیز EDS از ریزساختار تیوب کارکرده



شکل ۱۳- تصاویر SEM و آنالیز EDS از تیوب مقاوم به خوردگی

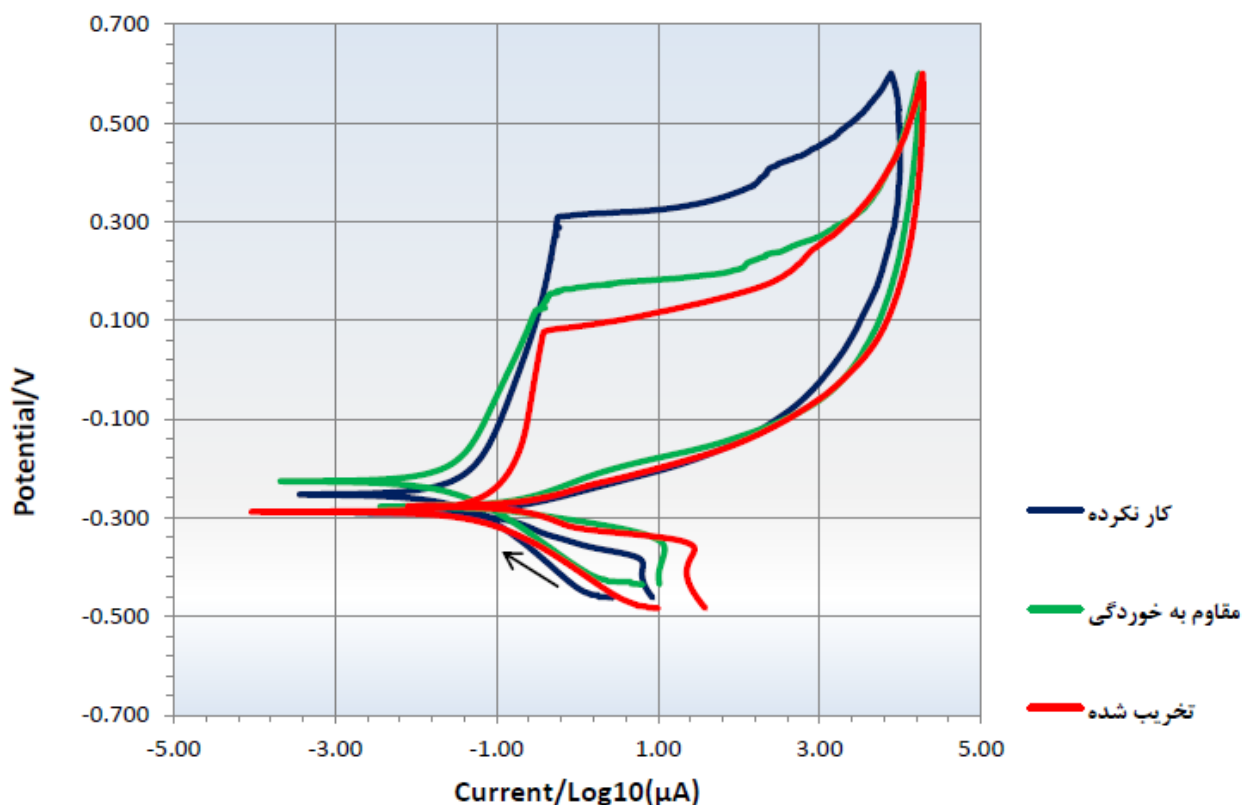
۳-۳- مقاومت به خوردگی

نتایج آزمون پلاریزاسیون سیکلی برای هر سه نوع تیوب در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد در شکل ۱۷ نشان داده شده است. مقادیر پتانسیل حفره دار شدن^۱ (E_{pitting}) و پتانسیل خوردگی^۲ (E_{corrosion}) برای هر کدام از تیوب‌ها در جدول ۴ نشان داده شده است. طبق مقادیر حاصل از نمودارهای آزمون پلاریزاسیون، مقاومت به خوردگی حفره‌ای مربوط به تیوب کارنکرده می‌باشد و تیوب تخریب شده دارای کمترین مقاومت به خوردگی حفره‌ای است. علاوه بر آن تیوب مقاوم به خوردگی، نجیب‌ترین پتانسیل خوردگی در بین سه تیوب را دارد و تیوب خورده شده دارای فعال‌ترین پتانسیل خوردگی

می‌باشد. تفاوت موجود در پتانسیل حفره دار شدن در نمونه‌های موجود نشان‌دهنده نقش حفاظتی بهتر لایه‌های تشکیل شده تیوب‌های کارنکرده و مقاوم به خوردگی می‌باشد. کاهش پتانسیل حفره دار شدن در تیوب تخریب شده نشان‌دهنده تشکیل مناطق مناسب برای خوردگی است. این مکان‌ها می‌تواند در اثر خوردگی زیر رسوبی باشد. در پدیده خوردگی حفره‌ای، شکست لایه اکسیدی محافظ در آلیاژ، یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار است. تخریب لایه اکسیدی در کنار لایه رسوبی شکل گرفته بر روی سطح تیوب، مکان‌های مستعد برای خوردگی حفره‌ای را به وجود می‌آورد که باعث کاهش پتانسیل حفره دار شدن می‌شود.

¹ Pitting Potential

² Corrosion Potential



شکل ۱۴ - نمودار آزمون پلاریزاسیون سیکی تیوب‌های کارنکرده، مقاوم به خوردگی و تخریب شده

جدول ۴ - نتایج حاصل از آزمون پلاریزاسیون سیکی تیوب‌های تخریب شده، کارنکرده و مقاوم به خوردگی

پتانسیل نمونه	Epotting mV vs. Ag/AgCl (Saturated KCl)	Ecorrosion mV vs. Ag/AgCl (Saturated KCl)
تخریب شده	80	-288
کار نکرده	310	-253
مقاوم به خوردگی	156	-226

نتیجه‌گیری

در این پژوهش خوردگی تیوب‌های ابزار دقیق مورد بررسی قرار گرفت و مشخص گردید که:

- اصلی‌ترین علت تخریب در تیوب‌ها می‌تواند مربوط به عدم انتخاب جنس مناسب تیوب‌ها با توجه به شرایط کاری آن‌ها در نظر گرفت. حساسیت به خوردگی موضعی از قبیل خوردگی حفره‌ای، خوردگی بین‌دانه‌ای و خوردگی تنشی (SCC) در محیط‌های حاوی کلر از مشکلات رایجی است که در اثر عدم انتخاب صحیح جنس تیوب‌ها ممکن است، رخ دهد.

- تنش‌های باقیمانده ایجاد شده در حین فرایند تولید این تیوب‌ها، می‌تواند این قبیل موارد خوردگی را تشدید و ترغیب کند و لازم است تنش‌های باقیمانده در این تیوب‌ها برطرف شوند.
- تخریب لایه اکسیدی در کنار لایه رسوبی شکل گرفته بر روی سطح تیوب، نواحی مستعد برای خوردگی حفره‌ای را به وجود می‌آورد. این نواحی مستعد، منجر به کاهش مقاومت به حفره‌دار شدن می‌شود.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله نویسندگان این مقاله از شرکت کاوش صنعت شیخ بهایی و دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی اصفهان بابت حمایت از این پژوهش کمال تشکر و قدردانی را دارند.

مراجع

- [1] Hertzberg, R.W., R.P. Vinci, and J.L. Hertzberg, Deformation and fracture mechanics of engineering materials. 2020: John Wiley & Sons.
- [2] Handbook, A., Properties and selection: Irons. Steels, and High-Performance Alloys, 1990. **1**: p. 2195.
- [3] Tankins, E., J. Kozol, and E. Lee, The shipboard exposure testing of aircraft materials. JOM, 1995. **47**: p. 40-44.
- [4] Oh, S.J., D. Cook, and H. Townsend, Atmospheric corrosion of different steels in marine, rural and industrial environments. Corrosion Science, 1999. **41**(9): p. 1687-1702.
- [5] Barton, K., Protection against atmospheric corrosion: theories and methods. 1976.
- [6] Alkan, S., Evaluation of pitting susceptibility and tribocorrosion behaviors of AISI 304 stainless steel in marine environments. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2023. **237**(4): p. 808-823.
- [7] Kamimura, T., et al., The role of chloride ion on the atmospheric corrosion of steel and corrosion resistance of Sn-bearing steel. Corrosion science, 2012. **62**: p. 34-41.
- [8] Mi, N., et al., Use of inkjet printing to deposit magnesium chloride salt patterns for investigation of atmospheric corrosion of 304 stainless steel. Corrosion Science, 2011. **53**(10): p. 3114-3121.
- [9] Cruz, R.V., A. Nishikata, and T. Tsuru, Pitting corrosion mechanism of stainless steels under wet-dry exposure in chloride-containing environments. Corrosion science, 1998. **40**(1): p. 125-139.
- [10] Ravindranath, K. and R. Alazemi, Failure of stainless steel 304L air cooler tubes due to stress corrosion cracking caused by organic chlorides. Engineering Failure Analysis, 2019. **102**: p. 79-86.
- [11] Tsutsumi, Y., A. Nishikata, and T. Tsuru, Pitting corrosion mechanism of Type 304 stainless steel under a droplet of chloride solutions. Corrosion science, 2007. **49**(3): p. 1394-1407.
- [12] Hoar, T. and W. Jacob, Breakdown of passivity of stainless steel by halide ions. Nature, 1967. **216**(5122): p. 1299-1301.
- [13] Pickering, H. and R. Frankenthal, On the mechanism of localized corrosion of iron and stainless steel: I. Electrochemical studies. journal of the Electrochemical Society, 1972. **119**(10): p. 1297.
- [14] Lu, Y. and M. Ives, The improvement of the localized corrosion resistance of stainless steel by cerium. Corrosion Science, 1993. **34**(11): p. 1773-1785.

- [15] Kappes, M.A., Localized corrosion and stress corrosion cracking of stainless steels in halides other than chlorides solutions: a review. *Corrosion Reviews*, 2020. **38**(1): p. 1-24.
- [16] Standard, A., E415, 2011. Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission (West Conshohocken, PA: ASTM International).
- [17] ASTM-G61, Test Method for Conducting Cyclic Potentiodynamic Polarization Measurement for localized Corrosion Susceptibility of Iron-, -Nickel-, or Cobalt-based alloys. 1992.